



流体フィルタの性能測定及び評価に関する研究

浦田 暎三*

田嶋 和夫**

Measurement and Estimate of Fluid Power Filters

Eizo URATA *

Kazuo TAJIMA **

1. 緒言

研究課題であるフィルタの性能測定は、作動流体の汚染管理を行うための基礎研究として欠かせない部分である。研究の報告に入る前に、作動流体の汚染管理とはどういうことであるかを説明しよう。作動流体は、流体駆動装置に充填する流体である。それでは流体駆動装置は、どのようなものか。建設機械、たとえばショベルカーで、バケットを動かしているのは、油圧シリンダである。ポンプで加圧された流体をシリンダに送りこむことにより、シリンダのピストンが駆動され、必要な作業が行われる。この場合のポンプからピストンまでの動力伝達系をまとめて、流体駆動装置という。このような流体駆動装置は、建設機械に限らず、車両、航空機、工作機械、クレーンなど、およそ強い力を出力として必要とする、あらゆる機械に装備されているもので、機械工業における基幹技術の一つである。

流体駆動装置の基本構成要素の一つはポンプである。ポンプがなければ流体の圧力を高めることができないから、流体駆動装置が成立しない。この分野で使うポンプは容積形ポンプと呼ばれ、その動作は、固体壁の移動により流体を押し出すという原理に還元できる。すなわち、図1のようなピストンシリンダ装置と同等なものである。図には上下運動するピストンと、ピストンの上下運動に同期して往復運動する弁機構が描いてある。図において、クランクの回転によりピストンが上に向かって動くときは、シリンダ室と吸い込み口を接続し（図1(a)）、下に向かって動くときは、弁が切り換わっていて、シリンダ室内の流体が吐き出し口から出る（図1(b)）。実際に使って

いるポンプでは、クランクに代わりにカムを使ったりするし、ピストン数を複数にしたりするが、原理は同じである。

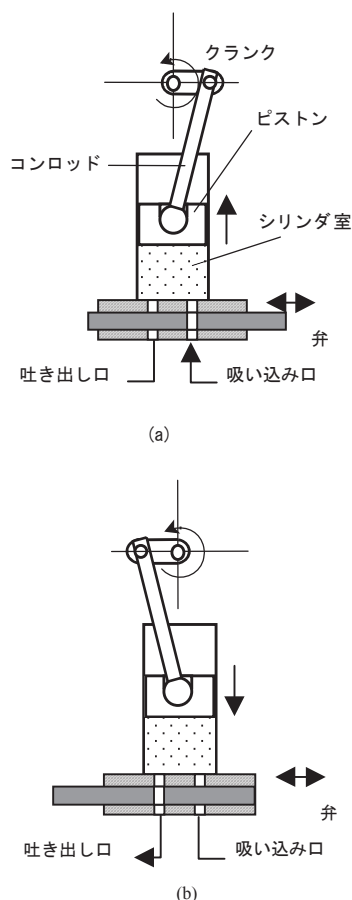


図1 流体駆動に用いるポンプ

*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

**教授 化学教室

Professor, Laboratory of Chemistry

ポンプは上記のように作動するのであるが、このとき、ピストンはシリンダにぴったりとはまっていなければならない。すき間があると、そこから流体が逃げてしまい、効率が下がるからである。もちろん、完全にすき間が無いならば、ピストンとシリンダ壁は固着してしまうから、微小なすき間は必要である。したがって、微小ながらすき間があり、そこを流体が流れることになる。その流体中にもし、砂粒のような固形物が混じっていたら、どうなるか。図2はすき間と、そこを通る微粒子を、やや大きめに描いたものである。

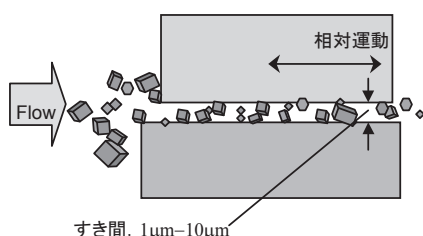


図2 すき間と微粒子

実は、二つの固体壁が相対運動するという状況は、ポンプ内の小さなピストンとシリンダ壁の間だけではなく、流体駆動装置で使用する、弁やアクチュエータ（出力要素）の中にも常に発生する。それゆえ、図2の状況は、流体駆動装置内では、ごく普通に生じているのである。すき間を通過する固体粒子の寸法が、すき間よりもずっと小さくて、粒子が流体と一緒に流れてしまうならば、別に問題は生じない。しかし、粒子がすき間と同程度大きさの場合には、複雑な問題が起こる。粒子は一般に不規則な形をしているから、すき間に流れ込んでから、途中で壁と噛み合ってしまうことがある。複数の微粒子がすき間内で合体してしまい、すき間内で壁面に固着することもある。このようなときに、壁面の平行方向相対運動が起これば、まず、壁面の摩擦力は増加し、摩耗が生じる。発生する摩擦により、二つの壁面の固着（焼き付き）が生じることもある。

固体微粒子による流体機器の損傷のおもなものは、上記の摩耗であるが、それ以外にも、いくつかを挙げることができる。弁では小さな孔を固定絞り、可変絞りとして利用する。その孔の開口面積を制御して、出力ピストンの速度制御などを行うのである。ここに微粒子群がやってくると、目詰まりや摩耗などが生じ、これが制御系の動作不良を引き起こす⁽¹⁾。

以上のように、作動流体中に微粒子が混入すると、装

置の性能、機能にさまざまな障害を起こす。イギリスでだいぶ前に行われた調査では、流体駆動の代表である油圧駆動装置における故障の80パーセントまでが作動流体中の微粒子などの不純物が原因であったという⁽²⁾。作動流体中の望ましくない混入物質をひっくるめて、汚染要因物と呼んでいる。流体駆動装置を故障無く運転を続けるためには、汚染要因物を常に除去し、作動流体を清浄に保つことが大切である。作動流体の汚染状態を適切な清浄度に管理することが、一般的な作動流体の汚染管理である。

2. 流体フィルタの性能評価

では、どうやって、流体の清浄度を管理するか。最も原始的であるが、それは細かい網のようなものを使って微粒子を渡し取ってしまうばよい。これ以外にも、静電気や磁気を使って、微粒子を吸引してしまうとか、渦巻きを起こして、固体と液体を分離するとか、いろいろな工夫はある^{(3),(4)}。しかし、これまでに圧倒的多数の流体駆動装置で使用されてきたのは、多孔質ないし、組み合わせた網と見立てられる、流体ろ過用のフィルタである。以下ではこの形式のフィルタについて議論を進める。

流体フィルタの基本的なイメージは篩（ふるい）である。流体駆動装置で使うものでは、金網や、紙、布、ナイロン繊維など樹脂繊維で作った網などを積層状にする。そこを流体が通過するときに、粒子を網にかけて、からめ取るのである。このような方法では、もちろん限度があって、サブミクロンの粒子まで取ることはむずかしい。しかし、先に述べた流体駆動の中にあるすき間の大きさは、2ミクロン程度がおおよその下限であるから、こうした篩方式が有効になる。

実際に装着するフィルタは、多数の小さな孔のある物体とみなすことができる。しかし、その孔の寸法、形状は一定ではない。小さな孔もあれば大きな孔もある。フィルタの上流からやってきた流体中の汚染要因物をすべて取ってしまうフィルタはない。なにがしかの汚染要因物はフィルタをすり抜けてしまうのである。フィルタ下流にすり抜ける汚染要因物が少ないほど、性能の良いフィルタということになる。工業製品としてのフィルタとなると、性能が悪いものは売れなくなるし、高性能のものほど、高い価格をつけることができる。フィルタのユーザは、自分の流体駆動装置に必要な、最低限度の性能を備えたフィルタを装備しよう、と考える。過剰設計はコスト高となるからである。ここに、フィルタ性能の評価という問題が出てくるのである。

2.1 フィルタ性能の表示方法

では、流体駆動用のフィルタのろ過性能はどのように評価すべきか。これはフィルタのメーカーとユーザの共通の問題であるから、工業規格ができて^{(5), (6), (7)}。国内では、JIS B 8356-8: 2002, 油圧用フィルタ性能評価方法—第8部：フィルタエレメントのろ過性能試験（マルチパス法）であり、国際的には、ISO 16889:1999, Hydraulic fluid power filters - Multi-pass method for evaluating filtration performance of a filter element, (1999)である。JIS B 8356-8: 2002 は、この ISO 規格を、「ISO との整合性」ということで、単に翻訳したものである。

この ISO 16889: 1999 は、実は ISO 4752, Hydraulic fluid power- Filters- Multi-pass method for evaluating filtration performance, (1986)⁽⁸⁾の改訂版である。旧版に関して、実地でのフィルタ性能の順位と、規格による試験結果の順位が一致しないという苦情や、フィルタ性能に関する基本認識の訂正などを考慮して、全面改訂されたのであるが、最も重要な点は見逃がされて、フィルタのろ過性能を測定する上では、依然として問題を抱えたままである。本研究は、この点を睨みながら展開をした。

さて、規格で使われているフィルタ試験法は、マルチパス試験法と呼ばれている。これを図3によって説明しよう。スラリーとは、微粒子を流体に混ぜたものである。この場合の微粒子は、試験用の粉体である。スラリー単位体積中の粉体質量を定めておき、一定の割合で、このスラリーをタンクに投入する。一方ポンプにより流体は回路を循環している。試験フィルタ上流の粉体濃度が n_u 、下流での濃度が n_d である。この場合、 n_u と n_d は、単位体積中の微粒子の個数で表す。すなわち（個数/ml）が測定単位である。フィルタが高性能であれば、下流の濃度は低くなる。この試験装置では、フィルタを通過した微粒子と、注入している微粒子の合計がフィルタ上流に現れ、流体も微粒子も試験フィルタを何回も通過するので、マルチパス試験法と名づけられたのである。

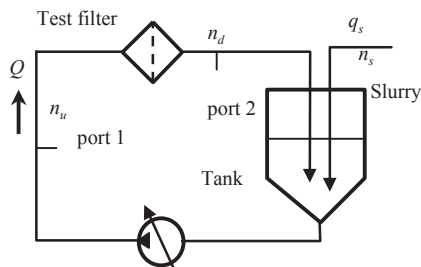


図3 マルチパス試験法

マルチパス試験法では、微粒子の上流濃度と下流濃度の比

$$\beta_x = n_{u,x} / n_{d,x} \quad (1)$$

によって、フィルタ性能を表す。ここで添え字 x は寸法が $x \mu\text{m}$ 以上の粒子という意味である。この値が大きいくほど、フィルタのろ過性能が優れていると評価するのである。上流濃度も下流濃度も試験時間にともなって変化する。それらの比は時間と独立な変数になるであろうか。実は、旧版の規格 ISO 4752 では、これがフィルタ固有の定数であるという仮定に基づいて作られていた。それゆえ、この規格では、上記の β の値を、フィルタ試験時間内に4回測定して、その平均値を取ることにしていた。しかし、その後多くの研究機関で行われた実験結果によって^{(9), (10)}、これは定数ではなく、試験時間の経過に伴って変化的ことが認められるようになった。そこで、時間に依存しない定数を得るために、試験時間中における n_u の平均値と n_d の平均値を求め、それをフィルタ性能の評価値と定義を変更したのである。改訂規格では、フィルタ試験終了までに10回の粒子数濃度測定を行う。

粒子数の計数を行う場合の粒子径は、投影面積により定義する^{(11), (12), (13)}。すなわち、粒子の投影面積が直径 x （ μm ）の円の面積と等しいときに、それを粒子径 x の粒子と呼ぶのである。計数はある寸法以上の粒子について行う。粒子径は連続的に分布しているので、ちょうど直径が x の粒子数を求めるというのは無意味だからである。

ISO 16889 では、 k 番目の測定時刻を t_k とし、そのときに、フィルタ上流で観測される、粒子径が x 以上の粒子数濃度（個数/mL）を $n_{u,x}(t_k)$ 、同様に下流で観測される値を $n_{d,x}(t_k)$ とし、

$$\beta_{x(c)} = \sum_{k=1}^{10} n_{u,x}(t_k) / \sum_{k=1}^{10} n_{d,x}(t_k) \quad (2)$$

と定義されている。 β の添え字 $x(c)$ はこの規格で指定する校正法⁽¹¹⁾による粒子計数機を用いるという拘束を表明したものである。だんだん明らかになって行くが、このようにところに問題解決の糸口があるのではない。何はともあれ、改訂前の規格における明らかな誤り、すなわち上流と下流の粒子濃度に比を定数と考えるという点は、時間平均を取ることによって回避された⁽⁹⁾。

しかし、これはおかしな方向に進んだのである。時間的に変化するから、時間平均を取って、時間の関数であるという性質を表に見せないようにしたに過ぎない。科学や技術というものは、こういうやり方で進歩するのではないだろう。定数ではなくて、時間の関数であることがわかったならば、それがどんな関数であるかを調べる方向に進めてこそ、進歩につながるのである⁽¹³⁾。比が定

数にならないならば、その比が何によって変化するかを調べるべきであり、時間依存性を見えなくするために時間平均の比を取るというのでは、科学ないし技術であることを放棄するものではないか。むしろ β は旧規格のままとし、それが時間の関数として変化する様子を記述、あるいは調べるように進める方が、発展性がある。

2.2 フィルタ性能の測定方法

一般に実用されている流体駆動装置に、フィルタを装着したときには、上流微粒子濃度が一定になっているわけではない。そして、フィルタを通過した微粒子が再度上流に現れる点はマルチパス法と共通する。そこでマルチパス法は実際の装置のシミュレーションになっている、という主張は当初からあった。すなわち、マルチパス法を1960年代に提案したFitch氏がそう述べている⁽¹⁾。しかし、規格に定める試験法における微粒子濃度は、実際の装置の微粒子濃度に比べて非常に大きいもので、とてもシミュレーションという言葉が当てはまる状態ではない。フィルタのろ過性能を測る場合には、この通過微粒子の再流入は、ノイズ以外の何者でもなく、マルチパス法の測定値の意味を不明確なものとしてしまう。

このことをもう少し具体的に説明しよう。一般の観測において、 y が観測している変数で、 x_1, x_2 がそれに影響を与えるパラメータないし独立変数であるとする。すなわち、

$$y = f(x_1, x_2) \quad (3)$$

であるとする。この関数関係を実験的に知ろうとすると、まず x_1 と x_2 の一方を固定値とし、他方を変えながら関数関係を調べる。たとえば(a_1, a_2, \dots, a_n)を定数として、

$$\begin{aligned} y_1 &= f(x_1, x_2 = a_1) = g_1(x_1), \\ y_2 &= f(x_1, x_2 = a_2) = g_2(x_1), \\ &\dots, \\ y_n &= f(x_1, x_2 = a_n) = g_n(x_1) \end{aligned} \quad (4)$$

のように、 x_1 と y の関数関係を表す一連の測定値から、(3)の関係を推定する。この一連の測定中において、 x_2 が定数とならずに変動していれば、それは y と x_1 の関係を表す式の誤差を増大させる。このことは、(3)右辺のパラメータの数が増えても同様である。

さて、フィルタ下流の流体の微粒子濃度は

$$n_d = F(n_u, t, Q, \nu, K) \quad (5)$$

のように表されるであろう。ここで、 t は時間、 Q は流量、 ν は流体の動粘度、 K はフィルタ固有のパラメータを代表して表示した。 K は複数に分解されるであろうが、ここでは説明を単純化するために、一つで代表させてある。

この場合、時間的に n_d が変る様子を観測するには、 t 以外のパラメータは定数に保っておかなければならない。ところが、マルチパス法では、 t に伴って n_u が変化してしまう。式(3)をフィルタのろ過性能の評価値とすることには、すでに述べた問題があるが、それ以前のデータそのものに上記のような、基本的な問題がある。

3 準シングルパス試験法

3.1 原理

上流側の微粒子濃度を一定に保って、フィルタ性能の測定を行うことが、まず必要である。マルチパス試験法の出現以前に行われていたフィルタのろ過性能試験は、工業用のフィルタそのものを測定するのではなく、フィルタに使用する網などのろ材の試験片を作り、それで試験を行うものであった。すなわち、試料を測定装置に取り付け、これに微粒子を含んだ一定量の流体を通過させる。フィルタ試験片上に補足した微粒子の総質量を測ったり、試験片を通過した流体の清浄度を調べる。この方法では、微粒子も流体も一度だけしかフィルタ試験片を通過しないから、シングルパス試験と呼ぶ。この方法は、小さな試験片にしか適用できない。工業上実装されるフィルタをこのやり方で試験するには、莫大な量の流体を用意しなければならないからである。マルチパス法は、この問題を解決したのであるが、フィルタ上流の微粒子濃度が一定でなくなるという欠陥が生じた。

本研究では、上流の微粒子濃度、流量、動粘度などを一定に保って実験を行うことを目標にした⁽¹⁴⁾。上流側微粒子濃度を一定にすれば、シングルパス試験と同等になる。本研究で考えた試験装置の原理図を図4に示す。

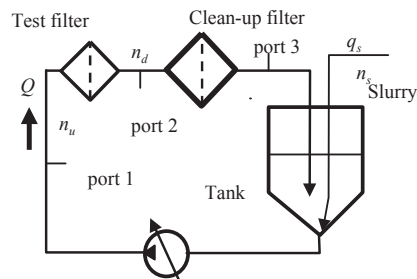


図4 準シングルパス装置

ここでは、クリーンアップフィルタが導入されていて、これによりフィルタ下流に出た流体を清浄化してからタンクに戻す。後述するが、スラリーはポンプ入り口で清浄

な流体と混合するようになっている。スラリーの微粒子濃度は一定に管理してあるので、ポンプ流量 Q とスラリー流量 q の比を一定に保てば、ポンプから吐き出される流体の微粒子濃度は一定になる。この場合には、試験フィルタを通過した微粒子は、クリーナップフィルタによって除去され、循環することがないが、流体は回路内を循環する。もちろん、クリーナップフィルタを通過する微粒子がゼロということは不可能であるから、準シングルパスと呼ぶことにした。

この実験では、フィルタ上流の微粒子濃度 n_u をポート 1 で、下流微粒子濃度 n_d をポート 2 で測定するほか、クリーナップフィルタの下流のポート 3 でも測定する。測定はオンラインで、一定時間（たとえば 5 分）ごとに行う。この場合、上流微粒子濃度は一定でなければならない。クリーナップフィルタ下流の微粒子濃度が一定水準を越えれば、それはマルチパス法と同じように、試験フィルタ上流の微粒子濃度を上昇させる。したがって、クリーナップフィルタ下流の流体清浄度は常に監視し、微粒子濃度が上昇したときには、クリーナップフィルタを交換しなければならない。

この実験方法が規格のマルチパス試験法と異なるもう一つの点は、スラリーの注入位置である。規格におけるマルチパス試験法では、タンクにスラリーを注入して攪拌することになっている。この方法によると、特に試験開始時に、フィルタ上流の微粒子濃度がなかなか上がらないという、過渡応答遅れを生じる。加えて、タンク内での攪拌の一様性や、微粒子のタンク内停留に注意しなければならない。本研究では、図 5 に示すように、スラリーの注入位置をポンプの入り口直前とした。

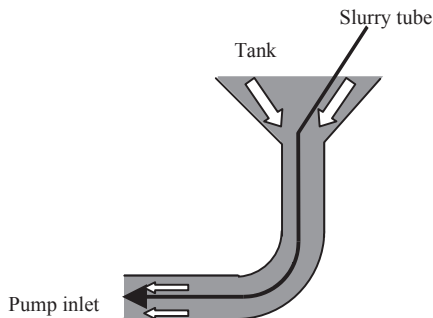


図5 スラリー注入位置

この注入位置の変更により、タンク内は常に清浄な流体で満たされ、注入したスラリー内微粒子は、すべて遅れなく試験フィルタ上流に現れるから、濃度変化に遅れ

が無くなり、また、タンク底部の配管に微粒子が滞留することも無くなる。

3.2 準シングルパス法実験装置

製作した実験装置を図 6 に示す。装置の構成と作用は次のとおりである。この実験は水を用いて行うので、部品はすべて、耐食性の材料を用いて製作してある。ポンプ、タンク、一部の配管要素と弁はステンレス鋼製である。配管要素はプラスチックを多用している。

ポンプ P_1 は装置を循環する水の流れ Q を生じさせるもので、ここではウェスコポンプを使用した。このポンプは動力学式のポンプであるが、高い吐き出し圧力を得ることができるからである。タンクからポンプ P_1 に吸い込まれた水は、ポンプを出て試験フィルタに至り、次いでクリーナップフィルタを通り、弁 V_1 を通ってタンク T_1 に戻る。流量 Q は主にポンプ回転数制御により調節し、弁 V_1 により微調節する。

水中微粒子の濃度測定は、オンラインカウンタ APC1 と APC2 を用いて行う。試験フィルタ上流の微粒子濃度は非常に高いので、カウンタ（APC）の測定レンジは APC1 と APC2 では異なる値に設定しなければならない。微粒子濃度を測定する試料の取り出し口は、試験フィルタ上流の Port 1、試験フィルタ下流の Port 2、クリーナップフィルタ下流の Port 3 である。流量計は主流 Q を測定する F_1 、カウンタに組み込んである F_2 及び F_3 、スラリー流量 q_s を監視する F_4 である。 F_2 および F_3 に、それぞれ直列に入っている弁 V_2 及び V_4 は試料流量を設定する。弁 V_3 は切り換え弁で、APC2 がポート 2 とポート 3 の試料を交互に測定するようにしてある。

Port 1 には、サンプリング用のストップ弁 V_8 が併設してある。これは、APC1 のレベルと、オフラインのカウンタとの相対値を検査するためのもので、試験中は閉鎖している。

圧力計がポンプ出口に設置してあるが、これは運転状態を監視するもので、その値は測定データとして必要なものではない。試験フィルタの上流と下流の間の圧力差を、差圧計により測定してある。この差圧はフィルタの状態を指示する重要な変数であり、微粒子濃度と並列して、観測記録の対象である。

循環回路（主回路）に対して、別回路から、一定濃度の微粒子を含んだスラリーを一定流量 q_s で供給する。スラリーと回路循環水の合流は、すでに説明したように、

- フィルタハウジング 2 (ステンレス) : 胴体直径 : 88.1 mm, 全高 : 384.5 mm.
- 圧力計 (監視用) : ブルドン管.
- 差圧計 : ひずみ計式差圧計 : 定格容量 : 196 kPa.
- 流量計 : 材質 : SUS304, 流量範囲 : 0.35-3.5 m³/h.
- 微粒子計数機 (APC1, APC2) :
- タンク : 直径 240 mm, 直管部長さ, 400 mm, 下部に直角円錐接続.
- スラリータンク : 主回路タンクと同一寸法. スラリータンクには羽根車式のスターアが取り付けられている.

3.3 実験の準備

フィルタ試験では, 試験前に装置の洗浄などの準備が必要である. 試験粉体が天然砂の場合は沈殿しやすいので, スラリータンクは常に攪拌しておく必要がある. スラリータンクにおける微粒子の沈殿を防止するには, 流体循環をさせる方法とスターアによる攪拌が考えられるが, この実験では両方を同時に使用した.

(a) 試験回路のクリーナップ

このクリーナップを行うには, まず装置内の水をすべて流し出してから, 水道水を入れてポンプによる流体の循環を行う. フィルタエレメントを装着しない状態で流体を循環させ, クリーナップフィルタにより汚染要因物を除去する. 装置内水量 15 L, ポンプ流量 30L/min, とすれば 10 - 15 分程度の運転で, 水は十分清浄になる. ここでいう十分清浄とは, 25 mL の試料流体中に 2 μ m 以上の微粒子が一つも観測されないことである. これは使用した計数器 (APC) の感度の限界である.

(b) 流量と圧力の制御

流量によりろ過性能は変化すると考えられるから, 異なる流量のもとでのろ過を測定する. 流量は試験フィルタとクリーナップフィルタのエレメントを装着し, 清浄な水が循環している状態で, 出口絞り弁 V_1 とインパータ回転数で流量計を見ながら設定する. フィルタ試験の運転中は, 絞り弁の調整のみで流量を一定に保つ. この状態で, フィルタハウジングの上流・下流の圧力差と流量の関係を測定しておく. このときの差圧測定値を, エレメント取り付け後のフィルタ試験の差圧測定値から差し引いて, フィルタエレメントによる圧力損失を求める.

スラリーをタンク底部で合流する方法を取ることににより, 装置内の微粒子分散の一様性の調査などの, 面倒な準備を不要にすることができ, 実験を簡素化できた.

(c) スラリーの準備

水 2 L 程度に数グラムの粉体を投入して攪拌したものをスラリーとする. これをスラリータンクに投入す

べよいように, 準備しておく. スラリーは実験中に順次作製しなければならない場合がある. ここで用いた粉体は, ISO 16889 などと同じ ISO MTD-A2⁽¹⁵⁾である.

3.4 実験条件の設定

試験中のシステム体積を一定に保つ. これは ISO 16889 のマルチパス試験法の場合と異なり, タンクの水位を一定として, ポンプの運転状態や, 水の温度などを安定に保ち, また空気の巻き込みなどを防ぐためである. マルチパス試験法では, これらに加えてフィルタ上流の微粒子濃度変動がデータに影響を与えるので, システム体積を精密に維持しなければならない. これに対し, 我々の実験では微粒子濃度はシステム体積とは無関係になるので, さほど厳密に体積を一定にする必要はない. スラリーポンプから注入する流量に比べて, APC から排出する流量の方が少ないので, 余剰の水を, 弁 V_8 を開いて排出する.

表 2 実験条件

条件	数値
試験システム体積 $V(L)$	15
注入システム体積 $V_i(L)$	15
試験流量 $Q(L/min)$	20,30,40
スラリー注入流量 $q(L/min)$	0.20
フィルタ上流基準濃度 $C_1(mg/L)$	3,10,15
注入チューブ Reynolds 数 : Re	1600

表において, フィルタ試験システムへの微粒子注入率 R (粒子数/時間) は,

$$R = C_1 Q = C_2 q, \quad C_2 = (Q/q) C_1 \quad (6)$$

である.

循環システム内の水の体積は, スラリー流量により増加し, APC への流出により減少する. これらの平衡を保つには, ポート 1 から連続的に水を排出するのがよいが, 適時タンク内水位を見て間歇排出しても良い.

このシリーズの実験では, スラリー注入管レイノルズ数は上記のようになる. スラリー注入チューブ内流れを乱流にするのが望ましい. そのためにはスラリー濃度を低下し, スラリータンクへの補充頻度を増加, システム水量調節など, 実験手順の改良を行う必要がある.

3.5 実験手順

(1) 試験装置の洗浄が終わったら, 試験回路流量を試験流量に設定し, ケーシング差圧を測定する.

(2) ポンプを止めてケーシングに新しいエレメントを装着する.

- (3) 弁1を開き, 弁2, 3を閉じてポンプを運転し, 絞り弁で流量を設定する.
- (4) 注入システムのポンプ運転を開始する. この時間が時間原点である.
- (5) 運転開始から5分ごとに試料をサンプリングポートから取る. 同時に差圧を記録する.
- (6) フィルタ差圧が指定値に達した場合には, ポンプ P_1 を止め, スラリポンプ P_2 を止めて実験を終る.
- (7) 同様に, n_d またはポート3 微粒子濃度が急上昇した場合にも, ポンプ運転を停止し, 実験を終了する.

4 準シングルパス実験結果

はじめに, 3つのポートにおける微粒子数と, 圧力損失の観測例を, 一つのエレメントについて示す. 本例では, 流量 20 L/min, 微粒子質量濃度は 15 mg/L である.

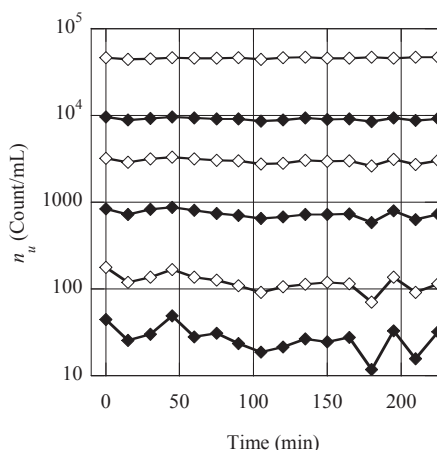


図7 上流微粒子濃度

図7は, ポート1 (フィルタ上流) の微粒子濃度である. マルチパス試験では, 時間経過により n_u は上昇するが, 本実験では試験期間中の汚染濃度がほぼ一定に保たれている. 試験時間中の微粒子濃度の変動は, 粒子径が小さいほど小さい. これは他の実験例でも同様である. 図8は粒子径ごとに見た変動係数である. 粒子径が $2\mu\text{m}$ では0.03程度であるが, $20\mu\text{m}$ では0.34にまでなる. これは時間的な変動ではなく, ランダムな変動であって, 粒子数計測に伴うばらつきである. このばらつきを小さくするには, 計測する流体の体積を増加させれば良い. この実験では流体体積を 25 mL に取っている. これを増加させてばらつきが減少することは別の測定で確かめている. 粒子数が多い $2\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$ のところで十分に変動係数が小さいことから, 上流濃度が一定に保たれている

ことがわかる. ここで採用した方法により, 上流微粒子濃度が一定に保たれることは, これで確認できたといえる.

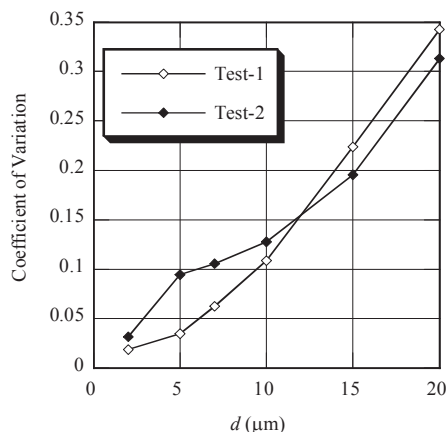


図8 変動係数

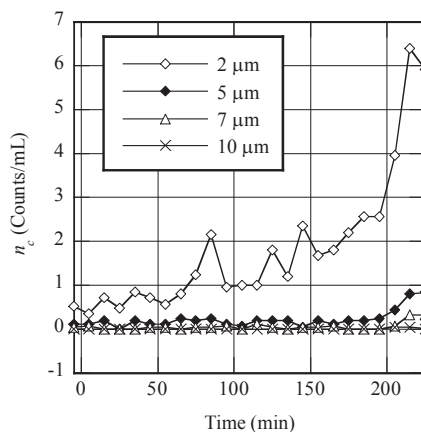


図9 クリーナップフィルタ下流微粒子濃度

次に, 図9はポート3の微粒子濃度である. 上流側の微粒子濃度が $2\mu\text{m}$ ではおよそ 34000 個/mL に対して, クリーナップフィルタ下流では1個/mLレベルである. これ以外の微粒子径においても, クリーナップフィルタ下流の微粒子濃度は十分に低いことが示されている. これはクリーナップフィルタが, 要求された機能を満足していることを示す. 実験の末期には $2\mu\text{m}$ 以上の微粒子のみが, フィルタ上流の 10^{-4} のオーダーまで上昇するが, 数値的に問題にならないレベルである. 以上のことから, クリーナップフィルタの使用により, シングルパスの条件が達成できたといえる.

次に試験フィルタの状態を観察しよう。図10は試験フィルタにおける圧力損失の経過を示す。この実験では、差圧は200 minあたりから急な上昇が始まっているので、実験は225 minで終了した。実験終了近くでの圧力上昇は極めて急峻で、 $\log\log(\Delta p)$ が時間の一次関数で近似できる程度である。

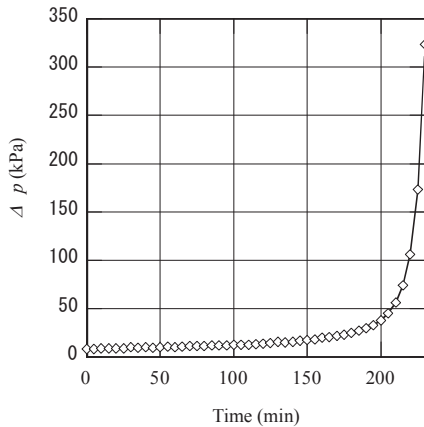


図10 差圧の変化

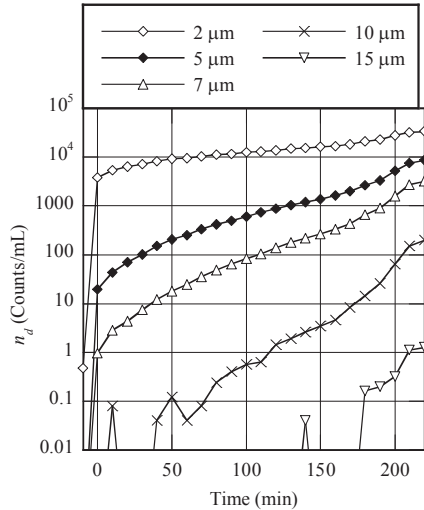


図11 フィルタ下流微粒子濃度変化

ポート2の微粒子濃度変化全体の様子を図11に示す。これは縦軸を対数軸で示してある。粒子径が小さい場合は、試験開始直後から、フィルタ下流側に微粒子が現れる。粒子径が大きくなるほど、粒子数が増加する時刻が遅くなるし、上流微粒子数に対する比率(1/β)も小さい。150 min くらいから10 μm 粒子が観測されている。また、150 min あたりでは、小さな粒子の増加割合も急になっ

ている。

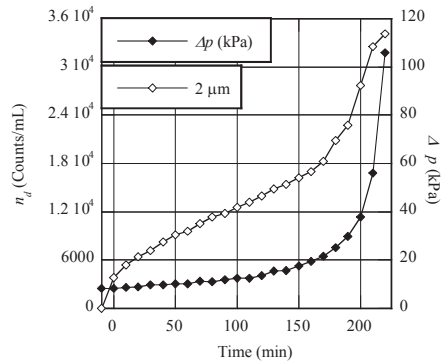


図12 2 μm 以上の微粒子濃度

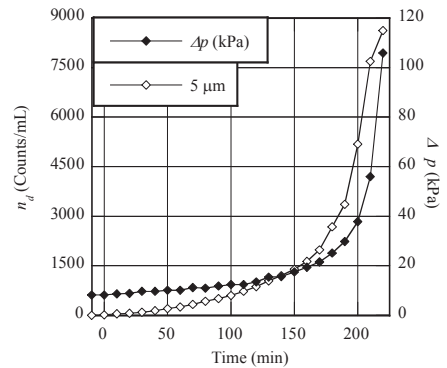


図13 5 μm 以上の微粒子濃度

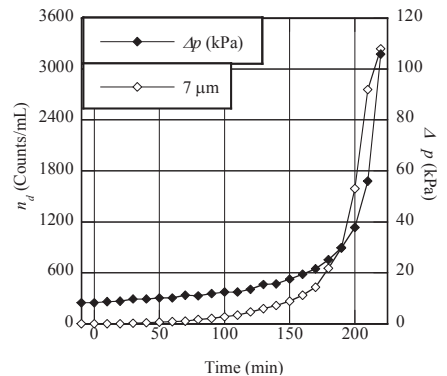


図14 フィルタ下流微粒子濃度：7 μm 以上

図12–16は、粒子径ごとの変化を示す。これらの図には、エレメント圧力損失も併記してある。

図12は2 μm 以上の微粒子数の変化を線形目盛りで示

してある。試験時間 200 min 程度以上で圧力上昇が急になるが、微粒子数濃度は、それよりもやや早く、150 min 程度から上昇が急になる。

図 13 は 5 μm 以上の微粒子数濃度である。図 12 と比べると、微粒子数濃度の上昇がやや遅れて、170 min 程度で始まる。

図 12, 13, 14 を比較すると、微粒子数濃度の急上昇が観測されるのは、粒子径が大きいほど遅いことがわかる。

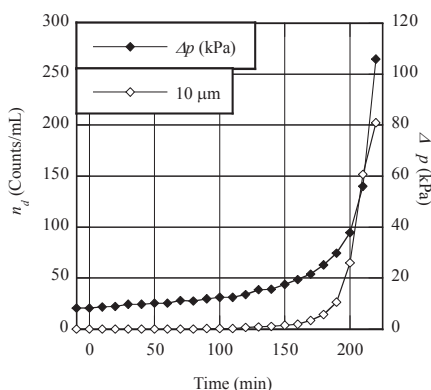


図 15 フィルタ下流微粒子濃度：10 μm 以上

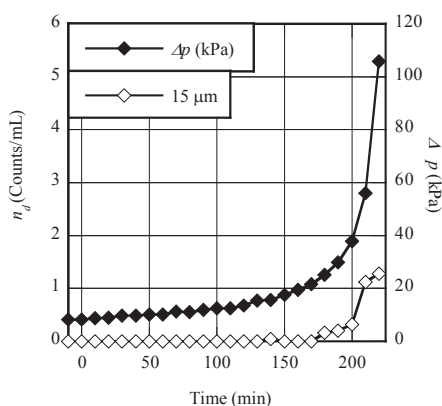


図 16 フィルタ下流微粒子濃度：15 μm 以上

図 15, 16 では、微粒子数の観測値がかなり低くなるので、数値的な再現性は悪くなるが、それでも時間経過に伴う粒子数増加が明瞭に示されている。

以上は一つの実験例について説明したのであるが、ここに示した傾向は、この形式のフィルタに対する多数の実験結果において共通するものである。ただし、フィルタの形式がデブス形でない場合の下流微粒子数濃度変化には、ここに示したような形と同じにはならないものが

ある。

5 考察

5.1 β に代わる数学モデル^{(14),(16),(17)}

フィルタ下流の微粒子数濃度は、フィルタ上流の微粒子数濃度の影響を受けるが、それは線形ではない。すなわち、上流微粒子数濃度を 2 倍にすると、下流の微粒子数濃度が 2 倍になるのではない。この様子を図 17 に示す。比較したデータは、同じ製造ロット内の二つのフィルタから得たものである。図 17 では、横軸を流量(Q : L/min)、質量濃度(m : g/L)及び時間(t : min)の積としてある。すなわち、フィルタに負荷した微粒子の総質量である。縦軸は 5 ミクロン粒子数濃度を、質量で割った値である。したがって、これは β の逆数と同じ挙動をする量である。横軸を単に時間としたのでは、高濃度の場合の方が短時間でフィルタが目詰まりするので、比較にならないからである。フィルタが寿命に達する、すなわち圧力が急上昇して、 n_d も急上昇するにいたる Qmt の値はほぼ等しいといえる。しかし、ろ過特性にかかわる、上流濃度と下流濃度の比、すなわち β がフィルタの特性値であるためには、この二つのデータが同じ曲線を描かなければならない。結果は明らかに異なる曲線であって、これは上流濃度に対して、 β が線形でないことを表している。

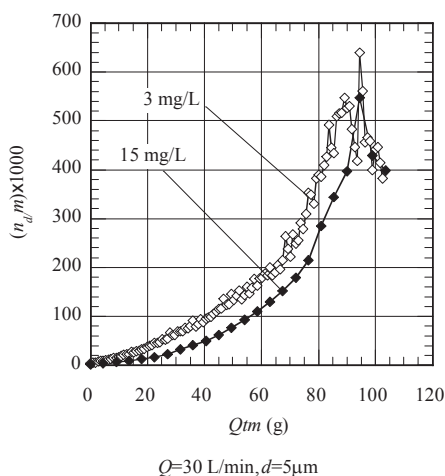


図 17 投入微粒子質量とろ過特性

それでは、フィルタ特性をどう表示するのが良いか。これはシングルパス法により、濃度や流速、流体粘度などをいろいろに変えた実験を行い、ろ過特性を表現する

数学モデルをまず作り、その数学モデルを表現するパラメータをフィルタの特性値とすべきである。これを実現するには、まず理論的に数学モデルを仮定し、実験により、その適用生を吟味する必要がある。数学モデルとして、著者は次のようなもの考えた。

フィルタの下流に至る微粒子は、流体に混じってフィルタの孔を通過する部分 N_a と、フィルタ組織に捕捉された微粒子が、その後で流体に洗い流される部分 N_b とから成る。つまり任意の時刻における上流微粒子濃度が直接下流濃度に比例するという、 β の思想は採用しない。実際すでに微粒子を多量に捕捉したフィルタの上流に清浄な流体を供給すれば、下流には微粒子で汚染された流体が出てくることは日常的に経験する。この意味から言っても、フィルタ特性値が β で表されると考えるのは無理なのである。Fitch 氏のグループも最初の β の定義の後に、この点に気づいて、 β の定義に修正を加える試みを行っている^{(18),(19)}。一方、単層のふるい (篩) や網を考えれば、上流の微粒子濃度に直接影響される部分もある。それゆえ、最も単純にモデル化するときには、 N_a は n_u にほぼ比例すると仮定するのが適当であろう。このときの比例係数は通路が小さいと小さくなる。通路の大きさは、流れが層流の範囲では、圧力損失に反比例するであろう。したがって、

$$N_a = K_1 n_u / \Delta p \quad (7)$$

とモデルを立てることができる⁽⁶⁾。このとき K_1 は定数ではないであろうが、変化の少ない変数と予想できる。

次は N_b である。これも、もとの微粒子は、過去においてフィルタに捕捉された微粒子の総数に依存する。この量を M とすれば

$$M = \int_0^t (n_u - n_d) dt \quad (8)$$

である。捕捉されていた微粒子がそのままフィルタに留まるか、洗い流されるかは、どの微粒子においても同じ確率である。ただし、その確率は、 M や Q の関数である可能性がある。したがって、

$$N_b = K_2 \int_0^t (n_u - n_d) dt \quad (9)$$

と表すとき、 K_2 は定数であるという保証はない。こままでの考察により、

$$n_b = K_1 \frac{n_u}{\Delta p} + K_2 \int_0^t (n_u - n_d) dt \quad (10)$$

が一つのろ過モデルとして使えることがわかる。実際フィルタの種類と、運転時間を制約すると、このモデルで K_1 , K_2 を定数として同定して良い場合はある。しかし、多くの場合、このモデルを使おうとすると、再び、 K_1 , K_2

が定数ではないという問題に遭遇する。それゆえ、このモデルを使うにしても、 K_1 , K_2 を運転パラメータの関数として、実験的に精査する必要がある。

ろ過における微粒子の吸着は網目による物理的拘束だけではない。ろ過プロセスを上記のような力学と幾何学で構成したモデルで表すことには、限界がありそうである。しかし、今の段階では、上記の K_1 , K_2 をさらに運転変数と、フィルタ固有の定数に分解するための考察ないし、実験が必要である。

5.2 試験用粉体の問題

試験用粉体は、ISO 16889 では、ISO MTD-A2 を使用することを指定している。これはアリゾナ砂漠の砂を分級して、粒子径分布を定めたものである。これ以外の粉体に対する、フィルタのろ過特性は知られていない。異なる粉体を用いれば、フィルタのろ過特性が異なって表示される可能性があると考えられている。しかし、このことに関する、研究データがないので、推定の域を出ていない。異なる粉体を使ったフィルタのろ過特性試験を行って見る必要がある。なぜなら、フィールドで使用されている流体中の微粒子は、アメリカのアリゾナ州周辺以外では、ISO MTD-A2 とは異なるものが主体となっているからである。

試験用粉体を使う場合には、次のような問題がある。第1は粒子径計測に関する問題、第2は微粒子とフィルタ素材の間の付着性 (粒子の通過特性)、第3は粉体の安定性である。

まず、粒子径計測の問題には、微粒子の形状問題との透明度の問題との二つがある。ISO 16889 では、不規則形状の粉体の寸法を、等価投影面積で同定している。この場合の校正に用いる微粒子は NIST で校正済みのラテックス球である。ISO MTD-A2 以外の粉体も、同様に等価投影面積による同定と、ラテックス球による校正を行うということで、良いであろう。

自動微粒子計数機における投影面積法は、光遮断法を使う。光遮断法では、透明度の高い微粒子の寸法は小さめに評価される。このことを、フィルタ試験の実務に反映して補正することは行われてもいないし、実行する方法も見つからない。それゆえ、この問題 (粒子の光透過度と色の影響) は無視しているのが現状である。現在の粒子径定義を他の粉体にも適用することの正当性は、かなり広範な調査研究を必要とするであろう。

5.3 微粒子形状とフィルタ捕捉性

形状は、フィルタの素材と粒子との付着性に影響をも

たらず可能性がある。粒子が網状構造のフィルタ素材を通過するときには、角ばった粒子の方が、球形粒子よりもひっかかりやすいことは、すぐに体験できる。このことから、試験用粉体を数種類用意して、それぞれに対するろ過性能を示すことが、一般性のある方法といえるであろう。この場合に、基準として採用する微粒子の形状を求めるとすれば、それは球形微粒子ということになる。適当な寸法分布を持つ球形の試験用粉体は既存でないから、これは人工的に製造する必要がある。適当な寸法分布とは、流体駆動装置の中で観測されるような粒子径分布である。フィルタ試験用に限定すれば、微粒子が液中で浮上したり、沈殿したりしないことも希望項目となる。天然砂の比重が 2.4 程度で沈殿しやすいのに対し、ラテックス球の比重は約 0.9 であるから、この点でも好都合である。そこで、ラテックス球の試験用粒子を製作することを試みた⁽²⁰⁾。これはフィルタを通してエチレンモノマーを噴出して、水中で重合させるものである。この方法で天然砂と類似の粒子径分布を得ることができることを確かめることができたが、分布形の管理はまだ十分な段階になっていない。

5.4 シミュレーション

マルチパス法が実際の流体駆動装置における微粒子流れをシミュレートしているという意見は、マルチパス法提案当初からあった⁽¹⁾。しかしこれに対する反論も古くからあった。その第 1 は、非定常流れのもとでのろ過特性は、マルチパス法で規定する定常流れのもとでのろ過特性よりも悪いというものである。流体及び微粒子を、フィルタ上流に間歇的に供給すれば、定常流れを基本とするマルチパス法よりも、フィールドでのフィルタへの負荷に近づけることができる。こうした観点でマルチパス法を改良しようという考え方も提案されている^{(21) (22)}。しかし、シミュレーションは、回路内の個々の要素特性が把握された後で、回路特性がどうなるかを見るときに有効になるのである。要素特性を単体で把握せずに回路シミュレーションを先に行うのは、効率の良い調査とはならない。この研究で行ったように、フィルタ単体の特性を知る方法を確立して、単体特性を求めてからシミュレーションに進むのが、合理的な順序であろう。

6 結語

流体駆動装置の汚染管理は重要な問題であるにもかかわらず、その基礎になるフィルタの使用、その性能表示などは、明確ではない。現実には、ひたすらフィルタ性

能を向上させてトラブル発生を防ぐことに注力している。その結果、現在では流体中の汚染要因によるトラブルは著しく減少している。装置や機器のメーカーではフィルタメーカーが推奨するフィルタを使用すれば、問題を生じないと考えている場合が多い。フィルタの選択の根拠は特に無く、強いて要求すれば、ISO 16889 によるデータということになる。ところが、この規格自体の、技術的根拠は極めて曖昧である。これが曖昧のまま放置されたのは、次のような事情があった。

まず、1980 年代における油圧駆動装置の作動油汚染によるトラブルが多発した状況に比べて、最近では、フィルタ性能が飛躍的に向上していて、油圧装置や機器のメーカーが特に意識しなくて良い状態となったので、フィルタ試験法は注目を集めなくなったのである。すなわち、多少過剰設計となるフィルタを使用していても、それに気づかない状態になったのである。そのため、基礎的考察を行う動機が消滅した。ところが、20 世紀の終わり頃から、水圧駆動装置の開発が始まった。この場合には、すき間の寸法を油圧の場合の 1/3 以下とすることが要求される。そのため、なおざりにしていた試験法や性能評価を改めて行う必要が生じてきた。

この研究では、流体フィルタの性能を客観的に表示する方法を探究した。現在、流体駆動の分野で適用されるフィルタのろ過性能評価は ISO 16889 による。これを調べて見ると、技術上の根拠にあやしい点があることがわかった。

その第 1 はフィルタ試験の方法である。これはマルチパス法と呼ばれているものであるが、一定に保つべき試験条件（フィルタ上流の微粒子濃度）が、一定に保たれない。この研究では、これを改めるための準シングルパス法を考案し、その有効性を確認した。

第 2 はフィルタ性能を表示するために規格で定義している β という量が、適切にろ過性能を表示しないことである。 β に代わるフィルタ特性を特徴づける、そのフィルタ固有のパラメータを定める必要がある。そこに至るためには、良い数学モデルが必要となる。この論文ではその数学モデルの試みを例示した。

試験用微粒子に関しても、現状のアリゾナ砂漠の砂が適当であるかどうかを、吟味した。試験用粉体の人工的に製作する研究も行ったが⁽²⁰⁾、紙数制限もあるので、本論文中に詳細を記さなかった。

この研究は、準シングルパス法の確認が主題であり、この部分については、いちおうの区切りまでとりついた。これだけでは非常に限られた専門的問題である。しかし、これが周辺のいろいろな問題と密接に関係してい

ることは、本文で述べたとおりである。この報告では、今回の研究課題だけではなく、周辺問題にも説明を加えて、より広い分野の人々の理解を得られるように努めた。

謝辞

本研究は神奈川大学工学研究所の平成 18 年度共同研究として、研究費の援助を受けて遂行された。この研究に関して、本年度以前から機械工学科・工藤邦男准教授、化学教室・今井洋子助手、機械工学科・鈴木健児助手の助力を受けたことを記し、厚く御礼申し上げる。浦田研究室でこの研究の基礎の構築に協力した、歴代の修士、杉山、代永、加藤、中村、折笠、土井、須田の諸君にも同じく謝意を表す。

参考文献

- (1) L. E. Bensch, E. C. Fitch and R. K. Tessmann, "Contamination control for the fluid power industry", Pacific Scientific Co., (1978).
- (2) J. S. Stecki (ed.), "Total contamination control", Fluid Power Net Publication, (1998).
- (3) H. Wotzinski: "Permanente Überwachung der Ölrinheit", O+P, 48-1, (2004), S.40.
- (4) A. Sasaki, et al: "Criticism on Oil Cleanliness Standard and Suggestion of a New Method", SICFP-97, (Linköping, 1997), p.243.
- (5) JIS B 8356-8: 2002, "油圧用フィルタ性能評価方法—第8部：フィルタエレメントのろ過性能試験（マルチパス法）”。
- (6) ISO 16889:1999, "Hydraulic fluid power filters - Multi-pass method for evaluating filtration performance of a filter element", (1999).
- (7) ANSI B93.31-1973, "Multi-Pass Method for Evaluating the Filtration Performance of a Fine Hydraulic Fluid Power Filter Element", American National Standards Institute, (1973).
- (8) ISO 4752, Hydraulic fluid power-Filters-Multi-pass method for evaluating filtration performance, (1986).
- (9) P. Dahmann. "Untersuchungen zur Wirksamkeit von Filtern in hydraulischen Anlagen", Dissertation der RWTH Aachen, (1992).
- (10) M. Mager, "Untersuchung der Feststoffpartikelkontaminationen in hydraulischen Systemen", Dissertation der RWTH Aachen, (1999).
- (11) ISO 11171:1999, "Hydraulic fluid power - Calibration of automatic particle counters for liquids", (1999).
- (12) ISO 11943:1999, "Hydraulic fluid power—On-line liquid automatic particle counting systems—Method of calibration and validation", (1999).
- (13) 浦田映三, "コンタミネーションコントロールの基礎研究", フルードパワーシステム, 37-6, (2006-11), p.332.
- (14) E. Urata, K. Suzuki and Y. Kato, "A quasi-single-pass test method for fluid power filters", PTMC2006, Professional Engineering Pub. Ltd., (Bath, 2006-9), p.95.
- (15) ISO 12103-1, "Road vehicles-Test dust for filter evaluation-Part 1: Arizona test dust", (1997).
- (16) E. Urata, "Evaluation of filtration performance of a filter", PTMC2002, Professional Engineering Pub. Ltd., (Bath, 2002-9), p.291.
- (17) E. Urata, "Notes on Contamination Control", The Sixth JFPS Intl. Symp. on Fluid Power, Proc. CD-ROM, (Tsukuba, 2005-11), p.629.
- (18) I.-T. Hong, "The beta prime-a new advanced filtration theory", Proc. of IMech Conference, "Contamination Control in Hydraulic Systems", (1984, Bath), p.83.
- (19) I.-T. Hong, and E. C. Fitch, "An Innovative Technique in Filter Rating", SAE Paper 851590, (1985).
- (20) E. Urata, K. Tajima, K. Suzuki and T. Suda, "A Suggestion of Artificial Filter Test Dust", Proc. The Tenth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP '07, (Tampere, 2007), Vol. 2, p.203.
- (21) L. E. Bensch and M. J. Day, "A realistic Approach To Measuring Filter Performance", IFPE 2000, (2000).
- (22) T. Namba and K. Izawa, "Realistic Filter Performance evaluation - Cyclic Stabilization Test", The Sixth JFPS Intl. Symp. on Fluid Power, Proc. CD-ROM, (Tsukuba, 2005-11), p.624.